

Contribution à l'étude de la convection thermosolutale tridimensionnelle dans un distillateur solaire incliné

F. OUESLATTI^a, B. BEN-BEYA^a, T. LILI^a

a. Faculté des Sciences de Tunis, Laboratoire de Mécanique des Fluides, 2092 El Manar II, Tunis, TUNISIE.

Résumé :

Nous présentons une étude numérique de la convection tridimensionnelle double diffusive dans un distillateur solaire de forme parallélépipédique incliné d'un angle particulier de 30° par rapport à l'horizontale. Les équations gouvernant l'écoulement sont résolues à l'aide d'un code volume finis « NASIM » utilisant la méthode de projection et une technique multigrille. Les taux de transfert de chaleur et de masse sont prédits en fonction du rapport des forces de volumes (N) et ceci pour le cas coopérant ($N > 0$) ainsi que pour le cas inverse ($N < 0$). Les résultats obtenus ont permis de caractériser la structure de l'écoulement ainsi que la distribution des champs de température et de concentration. Il a été montré en particulier que les taux de transfert moyens de chaleur et de masse sont minimales pour $N = -1$ pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh.

Abstract :

Three-dimensional double-diffusive natural convection in a parallelepipedic solar distiller inclined with an angle $\gamma = 30^\circ$ is investigated in the current study. Computations are performed using a home code "NASIM" based on the finite volume method and a full multigrid technique. It is found that iso-surfaces relative to temperature field undergo a central stratification while the lower and upper gradients seem to be significantly strengthened by gradually increasing the Rayleigh number values. In terms of buoyancy ratio effects, variations of average Sherwood and Nusselt numbers showed that the flow intensity is significantly enhanced by monotonously increasing N for aiding flow situation ($N > 0$). In addition, and according to all Rayleigh number values, heat and mass transfer rates seem to be minimum for $N = -1$.

Mots clefs : distillateur solaire, convection naturelle double diffusive, écoulement tridimensionnel

Introduction

La convection double diffusive a fait l'objet de plusieurs études depuis quelques décennies. Cet intérêt est dû aux nombreuses applications pratiques qui s'y rapportent, et cela dans divers domaines (océanographie, astrophysique, diffusion souterraine des polluants, géophysique,...)[1,2]. La distillation solaire constitue une application industrielle intéressante de la convection thermosolutale. En effet, des phénomènes de convection double diffusive se produisent dans le distillateur solaire, en raison des effets d'échanges des gradients thermiques et massiques ainsi que la différence de température entre un couvercle et un absorbeur [3]. Divers études expérimentales ont été réalisées dans le but d'explorer les phénomènes thermosolutaux qui se produisent dans les distillateurs solaires, cependant, la plus part de ces travaux ont concerné des configurations bidimensionnelles [4]. A la connaissance des auteurs, la première étude numérique tridimensionnelle incluant l'écoulement au sein d'un distillateur solaire a été menée par Ghachem et al. [5] évoquant les phénomènes de génération d'entropie. Les auteurs ont constaté que la variation des rapports des forces de volumes N affecte de manière significative le champ de température, de concentration, la structure globale de l'écoulement ainsi que l'intensité de l'entropie de génération totale. Cependant, aucune attention n'a été accordée à l'effet de l'inclinaison sur les phénomènes de transfert de chaleur et de masse dans un distillateur tridimensionnel. D'autre part, lors d'une investigation antérieure à notre présent travail, nous avons pu montrer qu'un maximum des taux de transferts de chaleur et de masse est obtenu pour une valeur d'angle d'inclinaison $\gamma = 30^\circ$. De ce point de vue, l'objectif de la présente étude est de prédire et d'analyser la convection double diffusive tridimensionnelle dans un distillateur solaire parallélépipédique inclinée à un angle $\gamma = 30^\circ$ par rapport à l'horizontale. La structure de l'écoulement tridimensionnel et les champs de gradients thermiques et massiques sont analysés en termes de vitesse, d'isosurfaces de température et de concentration. Les taux de transfert moyens de chaleur et de masse sont alors quantifiés.

1 Modèle physique et méthode numérique

La configuration géométrique du distillateur solaire est schématisée dans la Fig.1. Le modèle physique considéré est une cavité parallélépipédique inclinée d'un angle $\gamma = 30^\circ$. Le distillateur est de largeur W , de hauteur H et de profondeur D , ayant un rapport de forme $A_x = 1$ et deux rapports de formes longitudinal et transversal $A_z = H/W$ et $A_y = D/W$ égaux à 2. De plus, les propriétés thermophysiques du fluide sont supposées constantes excepté pour la densité volumétrique qui dépend linéairement des variables dimensionnelles ; la température T et la concentration C suivant l'approximation de Boussinesq :

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta_T (T - T_c) - \beta_c (C - C_c)] \quad (1)$$

Où ρ_0 est la densité du fluide à la température de référence $T_0 = (T_h - T_c)$ et de concentration $C_0 = (C_h - C_c)$. Notons ici que T_h , C_h , T_c et C_c désignent respectivement la température et la concentration dimensionnelles sur les deux parois chaude (notée par l'indice h) et froide (notée par l'indice c). $\beta_T = -(1/\rho_0)(\partial\rho/\partial T)_{p,c}$ et $\beta_c = -(1/\rho_0)(\partial\rho/\partial C)_{p,T}$ sont les coefficients d'expansion thermique et solutal, respectivement. Compte tenu des hypothèses mentionnées ci-dessus, les équations de conservation de continuité, de masse, d'énergie et de concentration peuvent être exprimées comme suit :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u \partial u}{\partial x} + \frac{v \partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + Ra \text{Pr}(\theta + Nc) \sin \gamma \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u \partial v}{\partial x} + \frac{v \partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{u \partial w}{\partial x} + \frac{v \partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + Ra \text{Pr}(\theta + Nc) \cos \gamma \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{u \partial \theta}{\partial x} + \frac{v \partial \theta}{\partial y} + \frac{w \partial \theta}{\partial z} = \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{u \partial c}{\partial x} + \frac{v \partial c}{\partial y} + \frac{w \partial c}{\partial z} = \frac{1}{Le} \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

Les quantités adimensionnelles $x_i=(x,y,z)$, $u_i=(u,v,w)$, t , p , θ , c indiquent les coordonnées spatiales, les composantes de vitesse dans les directions x_i , le temps, la pression hydrodynamique, la température et la concentration, respectivement. Les équations (2-7) sont adimensionnées en utilisant les échelles caractéristiques $W, \alpha/W, W^2/\alpha, \rho_0 \alpha^2/W^2, \Delta T, \Delta C$ pour les coordonnées spatiales, composantes de vitesse, temps, pression hydrodynamique, température et concentration, respectivement. Les termes ΔT et ΔC relatives à la température et la concentration ΔT et ΔC sont données par $\Delta T = T_h - T_c$ et $\Delta C = C_h - C_c$. Par ailleurs, la température θ et la concentration c adimensionnelles sont définies par $\theta=(T-T_0)/\Delta T$ et $c=(C-C_0)/\Delta C$. L'adimensionnement des équations de Navier-Stokes fait apparaître les paramètres adimensionnels caractérisant l'écoulement qui sont le nombre de Prandtl, le rapport des forces de volumes, le nombre de Rayleigh et le nombre de Lewis définis par $\text{Pr}=\nu/\alpha$, $N=\beta_c(C_h-C_c)/\beta_T(T_h-T_c)$, $Ra=gW^3\beta_T(T_h-T_c)/\nu\alpha$, $Le=\alpha/D$. Le terme ν désigne la viscosité cinématique du fluide, α et D sont les diffusivités thermiques et massique et g est l'accélération due la gravité.

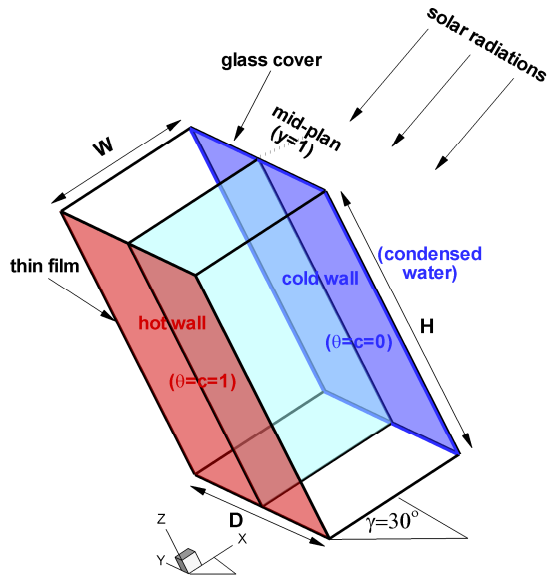


FIG. 1 – Configuration géométrique du distillateur solaire incliné.

Les conditions aux limites imposées dans le distillateur solaire sont données comme suit :

Les composantes de vitesse sont supposées nulles sur toutes les parois ($u=v=w=0$).

Au plan $x = 0$: $\theta = c = 1$,

Au plan $x = 1$: $\theta = c = 0$,

Ailleurs : $\frac{\partial \theta}{\partial n} = \frac{\partial c}{\partial n} = 0$, où n désigne la direction

de la normale à la face considérée.

Les nombres de Nusselt et Sherwood moyens sont

définies par $\overline{Nu} = \frac{1}{A_y A_z} \int_0^{A_y} \int_0^{A_z} \left(-\frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \Big|_{x=0,1} dy dz$ et

$$\overline{Sh} = \frac{1}{A_y A_z} \int_0^{A_y} \int_0^{A_z} \left(-\frac{\partial c}{\partial y} \right) \Big|_{x=0,1} dy dz$$

Il est important de noter que les simulations ont été effectuées pour une grille $32 \times 64 \times 64$ à l'aide d'un code maison baptisé « NASIM » et développé par le deuxième auteur. Il s'agit d'un code volumes finis qui emploie la méthode de projection pour contourner le problème du couplage vitesse pression et utilise un schéma QUICK pour le calcul des termes de convection. Une technique multigrille utilisant quatre niveaux de grilles a été employée pour accélérer la convergence de la procédure numérique.

2 Résultats et discussions

2.1 Effets du nombre de Rayleigh

Les résultats numériques ont été effectués pour $Pr = 0,71$, $Le = 0,85$ et $Sc = Le \times Pr = 0,6035$ qui couvrent la vapeur d'eau dans l'air. Il est à noter que toutes les simulations ont été conduites pour des valeurs du nombre de Rayleigh dans l'intervalle $10^3 \leq Ra \leq 2 \times 10^4$. En outre, le rapport des forces de volume N a été varié dans l'intervalle $[-5, 5]$. Dans cette section, nous analysons l'influence du nombre de Rayleigh sur la structure de l'écoulement tridimensionnel et les transferts thermiques et massiques présents dans le distillateur solaire.

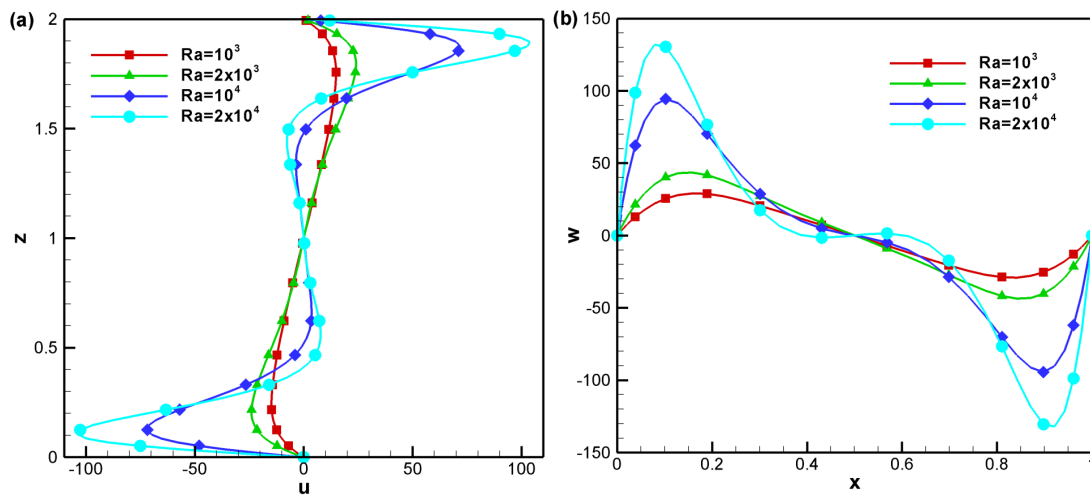


FIG. 2 – Profils des variations spatiales des composantes de vitesse $u(z)$ et $w(x)$ sur le plan médian ($y = 1$), correspondant à $Ra = 10^3, 2 \cdot 10^3, 10^4$ et $2 \cdot 10^4$ pour la valeur du rapport des forces de volume $N = 5$: (a) $u(z)$ et (b) $w(x)$.

Sur les Fig.2 (a) et (b) sont reportées les variations spatiales des composantes de vitesse $u(z)$ et $w(x)$ dans le plan médian ($y=1$) à différents nombres de Rayleigh $Ra = 10^3, 2 \cdot 10^3, 10^4$ et $2 \cdot 10^4$. Comme nous pouvons le

constater, les profils présentent une parfaite centro-symétrie par rapport au plan médian ($y=1$). Par ailleurs, l'intensité de circulation de l'écoulement semble nettement s'intensifier avec l'augmentation progressive du nombre de Rayleigh.

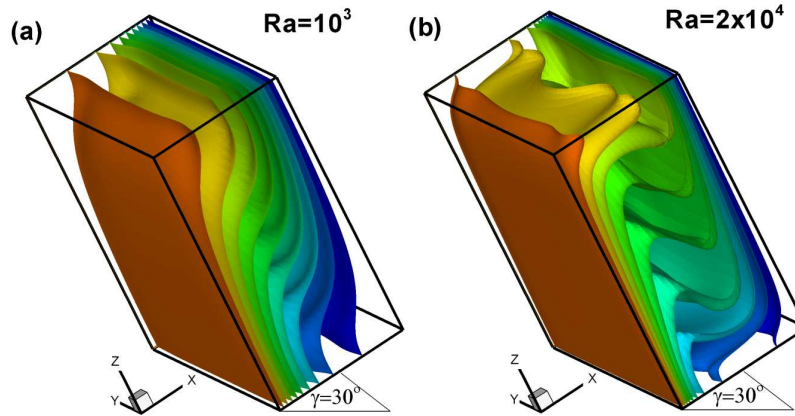


FIG. 3 – Iso-surfaces de la température relatives à la valeur du rapport des forces de volume $N = 5$ $Ra = 10^3$ et $Ra = 2 \times 10^4$, respectivement: (a) $Ra = 10^3$ (b) $Ra = 2 \times 10^4$.

La Fig. 3 illustre les isosurfaces de la température prédites à $N=5$ avec $Ra = 10^3$ et $Ra = 2 \times 10^4$. Pour $Ra = 10^3$, les isothermes décrivent des surfaces quasi-parallèles présentant une légère distorsion au centre de la cavité avec gradient thermique accentué dans les parties supérieure et inférieure du distillateur. En augmentant la valeur de Rayleigh à $Ra = 2 \times 10^4$, la distorsion des isothermes devient plus marquée et les gradients thermiques inférieurs et supérieurs semblent s'intensifier de façon significative.

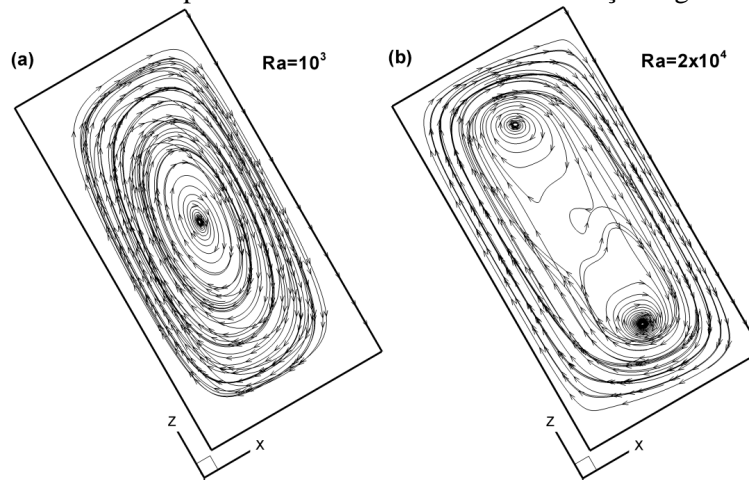


FIG. 4 – Comparaison de la projection des trajectoires de particules de fluide dans le plan (x, z) relativement aux deux valeurs du nombre de Rayleigh $Ra = 10^3$ et $Ra = 2 \times 10^4$.

La Fig. 4 illustre une comparaison de la projection des trajectoires de particules de fluide dans le plan (x, z) pour les deux valeurs du nombre de Rayleigh $Ra = 10^3$ et $Ra = 2 \times 10^4$. Pour la valeur minimale investie $Ra = 10^3$, l'écoulement est décrit par un tourbillon principal centré tournant dans le sens horaire et occupant la majeure partie de la cavité. En augmentant le nombre de Rayleigh à la valeur $Ra = 2 \times 10^4$, le tourbillon principal semble se diviser en deux tourbillons secondaires contrarotatifs symétriquement repartis par rapport au plan ($y=1$) et se dirigent vers les deux parois adiabatiques horizontales.

2.2 Influence du rapport des forces de volume N

Sur la Fig. 5 sont illustrées les isosurfaces du module de la vitesse ainsi que celles relatives à la température et la concentration pour $N=-5, 0$ et 5 . Pour le cas où les deux gradients thermique et solutal sont opposés ($N=-5$), la vitesse de l'écoulement semblent être importante au niveau des parois actives et s'accélère de façon significative en passant au cas coopérant donnant naissance à un tourbillon central occupant la majeure partie du distillateur. Par ailleurs, l'observation des isosurfaces relatives à la température et la concentration

montre une forte ressemblance pour toutes les valeurs de N investies. Par ailleurs, et pour $N=-5$, les isosurfaces de θ et c semblent être plus intense aux niveaux des parois verticales présentant une légère distorsion au centre de la cavité avec un excès de gradient dans la partie supérieure et inférieure du distillateur. En passant à la valeur $N=0$ correspondant à la situation limite, la distorsion centrale s'accroît et le gradient thermique et solutal inférieure et supérieure semblent s'intensifier de façon importante. Ces effets persistent et de manière plus importante pour la valeur maximale du rapport des forces de volume $N=5$.

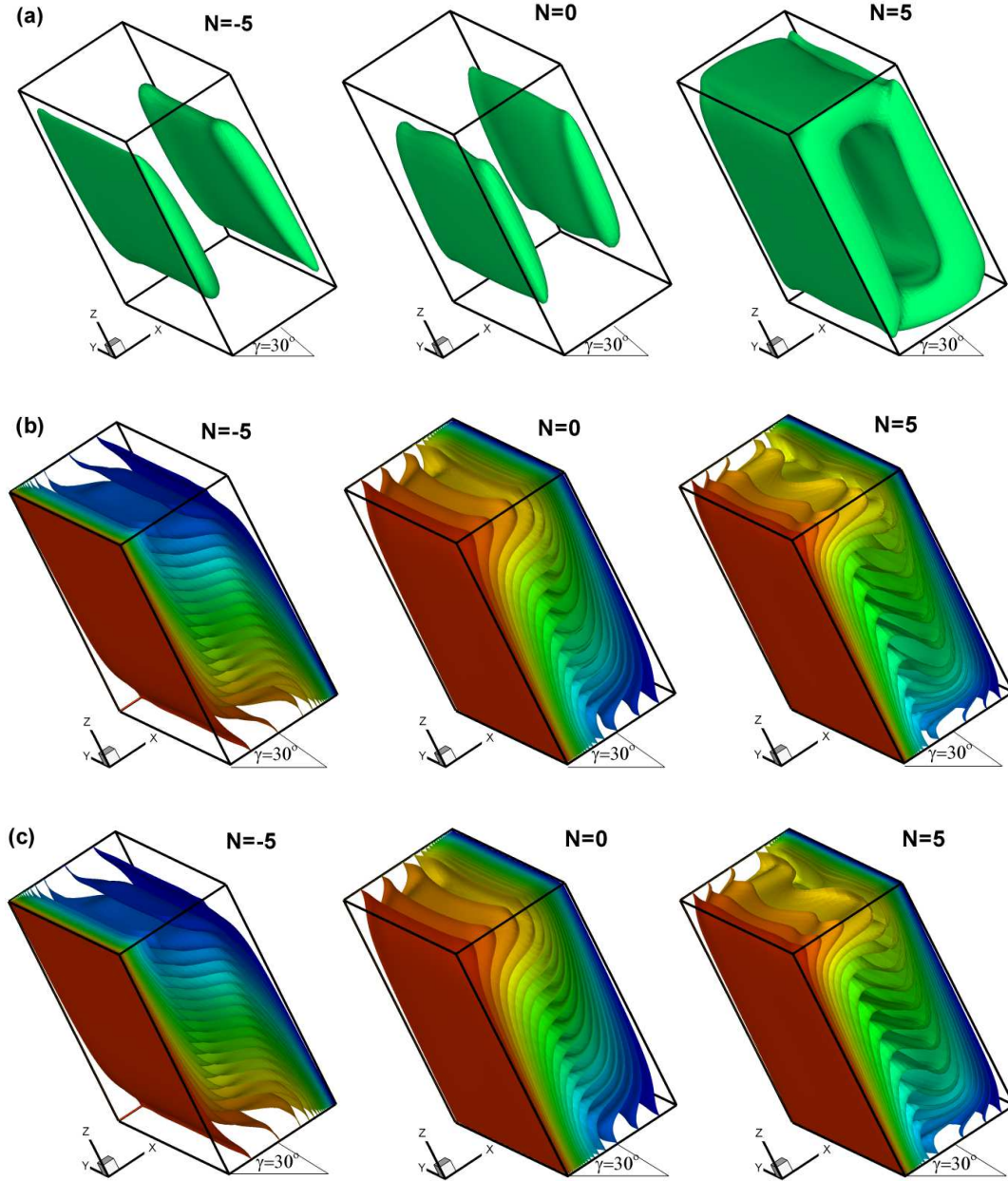


FIG. 5 – Isosurfaces (a) du modules de vitesse ($|\vec{V}| = 35.79$), (b) de température et de (c) concentration pour $N=-5, 0$ et 5 relativement à la valeur $Ra=2.10^4$.

Pour mettre en évidence l'effet combiné du nombre de Rayleigh Ra et du rapport des forces de volume N sur les taux des transferts thermique et solutal dans le distillateur solaire, les variations des nombres de Nusselt et Sherwood moyens pour différents Ra sont reportées sur la Fig. 6.

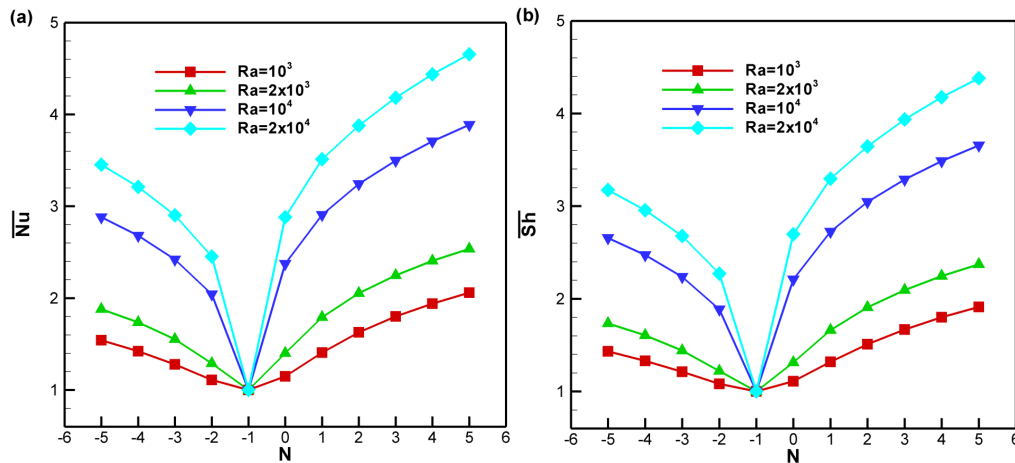


FIG. 6 – Effet combiné du nombre de Rayleigh Ra et du rapport des forces de volume N pour $Ra=10^3$,

$2 \cdot 10^3$, 10^4 et $2 \cdot 10^4$: (a) Variation de \overline{Nu} en fonction de N , et (b) Variation de \overline{Sh} en fonction de N .

Les profils montrent bien deux comportements similaires présentant une décroissance dans le cas opposant et une augmentation croissante pour le cas coopératif. Par ailleurs, en augmentant le nombre de Ra , les valeurs de \overline{Nu} et \overline{Sh} semblent subir une augmentation significative. En outre, tous les profils de \overline{Nu} et \overline{Sh} présentent un minimum pour la valeur du rapport des forces de volume $N=-1$ et ceci pour les différentes valeurs de Ra . Il est important de noter que cette valeur spécifique de N correspond à la valeur où les effets de cellules thermiques et solutales sont comparables d'après ce qui a été révélé dans les travaux, pour le cas bidimensionnel, de Nishimura et al. (1998). De même, un comportement similaire des variations des nombres de Nusselt et Sherwood moyens présentant un minimum pour $N=-1$ a été aussi observé par Sezai et Mohamed [2] pour une cavité cubique.

3 Conclusion

Une étude numérique de l'écoulement tridimensionnel dans un distillateur solaire incliné d'un angle $\gamma = 30^\circ$ a été menée dans le présent travail. Les résultats mettent en évidence de nettes modifications dans les caractéristiques de l'écoulement et de l'intensité des transferts de chaleur et de masse dans le distillateur en fonction du nombre de Rayleigh et du rapport des forces de volumes. Il a été observé une nette distorsion des isosurfaces de température qui se produit au centre du distillateur en augmentant Ra . Les trajectoires de particules fluides montrent aussi que le vortex central semble se scinder en deux tourbillons secondaires avec l'augmentation de Rayleigh. Par ailleurs, les variations des nombres du Nusselt et Sherwood moyens en fonction de N révèlent une décroissance des taux de transfert thermosolutal pour le cas opposant, subissent un minimum pour la valeur $N=-1$ puis augmentent de manière progressive dans le cas coopératif.

Références

- [1] Nishimura T.N., Wakamatsu M., Morega A.M., Oscillatory double-diffusive convection in a rectangular enclosure with combined horizontal temperature and concentration gradients, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 41, 1601–1611, 1998.
- [2] Sezai I., Mohamed A.A., Double diffusive convection in a cubic enclosure with opposing temperature and concentration gradients, *Physics of Fluids* 12, 2210–2223, 2000.
- [3] Sampathkumar K., Arjunanb T.V., Pitchandia P., Senthilkumar P., Active solar distillation-a detailed review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1503–1526, 2010.
- [4] Chouikh R., Ben Snoussi L., Guizani A., Numerical study of the heat and mass transfer in inclined glazing cavity: Application to a solar distillation cell, *Renewable Energy*, 32, 1511–1524, 2007.
- [5] Ghachem K., Kolsi L., Mâatki C., Hussein A. K., Borjini M. N., Numerical simulation of three-dimensional double diffusive free convection flow and irreversibility studies in a solar distiller, *Int. Communications in Heat and Mass Transfer*, 39, 869–876, 2012.